

ОТЗЫВ

официального оппонента Гинзбурга Наума Самуиловича
на диссертацию Григорьевой Наталии Вадимовны
«Особенности синхронизации и подавления паразитных колебаний в
гиротроне при воздействии внешнего гармонического сигнала»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика

Среди электронных приборов миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн несомненное лидерство по совокупности параметров занимают гиротроны. Для большинства приложений гиротронов необходимо обеспечить одномодовую генерацию с высоким КПД и стабильность частоты излучения. Одной из ключевых областей использования гиротронов является электронно-циклотронный нагрев плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза (УТС). Поскольку в УТС функционируют комплексы из нескольких гиротронов, их когерентная работа становится критически важной для стабилизации неустойчивостей. Кроме того, резонаторы современных мощных гиротронов как правило являются сверхразмерными, вследствие чего обостряется проблема конкуренции мод.

В последнее время привлекла внимание идея синхронизации мощного гиротрона с сигналом гиротрона-драйвера, имеющим стабилизированную частоту. Недавно в ИПФ РАН был проведен эксперимент по синхронизации мегаваттного гиротрона диапазона 170 ГГц стабилизированным гиротроном-драйвером необходимой мощности. Исследования показали, что воздействие внешним сигналом позволяет не только стабилизировать частоту генерации, но и подавить паразитные моды, расширив область параметров, в которых колебания рабочей моды устойчивы. В ряде случаев это приводит к увеличению мощности и КПД генерации. Однако детальная теоретическая картина синхронизации гиротрона, описанная в терминах теории колебаний и нелинейной динамики, на сегодняшний день развита недостаточно. Таким

образом, тема диссертации, которая направлена на решение указанной выше проблемы, является актуальной.

Основное содержание диссертации изложено в трех главах. В первой главе изучаются особенности синхронизации в рамках одномодовой модели гиротрона с фиксированной гауссовой продольной структурой ВЧ поля. Ключевой особенностью является то, что в диссертации развита упрощенная модель, в которой используется интерполяция предварительно рассчитанной функции электронной восприимчивости, характеризующей мощность взаимодействия пучка с полем резонатора. Это дает возможность перейти от известных уравнений теории гиротрона с фиксированной структурой ВЧ поля к динамической системе с одной степенью свободы, которую достаточно просто можно исследовать известными методами теории колебаний. В диссертации проведен бифуркационный анализ стационарных состояний системы, построены области устойчивости на плоскости параметров амплитуды и частоты внешнего сигнала. Проанализирована трансформация структуры этих областей при изменении тока пучка. Выявлен ряд новых особенностей, обусловленных тем, что в гиротроне режимы высоким КПД как правило достигаются, когда имеет место жесткое возбуждение рабочей моды. В последнем разделе первой главы проведен анализ режимов синхронизации при изменении расстройки циклотронного резонанса и безразмерного параметра тока. Такой подход традиционно используется при теоретическом анализе режимов генерации в гиротроне.

Во второй главе обсуждается влияние паразитных мод на картину синхронизации. Описана методика анализа автомодуляционной неустойчивости рабочей моды для модели гиротрона с эквидистантным спектром мод. Хотя данная методика в принципе известна и была предложена ранее в работах Г.С. Нусиновича и соавторов, в диссертации впервые представлен достаточно полный анализ структуры зоны устойчивости при различных значениях параметра плотности спектра и при различном количестве учитываемых пар сателлитов. Далее проведена

адаптация используемой методики на случай гиротрона, синхронизируемого внешним сигналом. Показано, что увеличение амплитуды внешнего сигнала приводит к подавлению паразитных мод. Таким образом, режимы генерации с высоким КПД становятся устойчивыми. Описанная картина качественно согласуется с результатами экспериментальных исследований, выполненных в последнее время в ИПФ РАН.

В третьей главе на примере гиротрона диапазона 250 ГГц, разрабатываемого для проекта ДЕМО, показана возможность подавления паразитных мод, возбуждающихся на фронте импульса ускоряющего напряжения, при воздействии внешнего сигнала. С помощью теоретического анализа и численного моделирования продемонстрировано, что воздействие внешним сигналом с мощностью порядка 10% выходной мощности в процессе установления рабочего напряжения позволяет существенно расширить зону устойчивости рабочей моды в области более высоких значений расстройки циклотронного резонанса. В результате по окончании переходного процесса происходит установление стационарного режима генерации рабочей моды.

Перечисленные выше основные результаты диссертации являются оригинальными и обладают научной новизной и представляют очевидный практический интерес для научно-исследовательских организаций (прежде всего ИПФ РАН), занимающихся исследованиями и разработкой гиротронов и ряда других приборов СВЧ электроники. Также результаты диссертации могут быть использованы в учебном процессе в высших учебных заведениях, ведущих подготовку в области радиофизики. Достоверность и обоснованность результатов подтверждается использованием хорошо апробированных методов и подходов, причем результаты теоретического анализа хорошо согласуются с численным моделированием.

По содержанию диссертации можно сделать ряд вопросов и замечаний, часть из которых следует рассматривать как пожелание для последующего развития исследований:

1. В главе 1 бифуркационные сценарии перехода в режим синхронизации наиболее подробно исследованы для случая, когда безразмерный параметр тока $I_0=0.059$, что примерно соответствует режиму с максимальным КПД в автономном гиротроне. С другой стороны, далее (п. 1.4) делается вывод, что наиболее благоприятной для режима синхронизации является ситуация, когда безразмерный параметр тока принимает существенно более низкие значения ($I_0=0.02-0.03$). Более логичным было бы представить результаты бифуркационного анализа именно для этого случая.

2. В главе 2 анализ условий автомодуляционной неустойчивости рабочей моды проводится в упрощенной ситуации, когда добротности и безразмерные параметры тока всех мод считаются одинаковыми, а холодный спектр собственных частот является в точности эквидистантным. Было бы интересно увидеть, как трансформируется зона устойчивости при увеличении расстройки. Представляется, что при этом границы распадной неустойчивости должны постепенно переходить в соответствующие границы для несинхронного двухмодового взаимодействия. Однако в диссертации подобные результаты не представлены, хотя утверждается (стр. 77), что это не представляет сложности.

3. В главе 3 считается, что выброс на фронте импульса ускоряющего напряжения приводит лишь к изменению расстройки циклотронного резонанса (формула 3.1). При этом не учитывается изменение других параметров, например, питч-фактора и тока электронного пучка. В формуле 3.1 присутствуют два безразмерных параметра α и τ_0 , которые характеризуют максимальное значение расстройки и характерное время ее изменения. Желательно привести реальные значения этих параметров для конкретного гиротрона диапазона 250 ГГц, который обсуждается в данной главе.

4. Желательно было провести сопоставление с результатами анализа автомодуляции и распадной неустойчивости для модели лазеров на свободных электронах, в которой впервые была описана распадная

неустойчивость в случае эквидистантного спектра мод (N.S. Ginzburg, M.I. Petelin, Int. J. Electronics, vol. 59, pp. 291-314, 1985).

Однако отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку работы и не снижают общего положительного впечатления от диссертации. В целом можно заключить, что диссертация Н.В. Григорьевой представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой решена актуальная задача современной радиофизики. Основные выводы и положения, выносимые на защиту, представляются обоснованными и достоверными. Автореферат достаточно полно и правильно отражает основное содержание диссертации. Материалы диссертационной работы опубликованы в 6 научных статьях в ведущих научных журналах (Изв. вузов. Радиофизика, Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика, ЖТФ), которые входят в список изданий, рекомендуемых ВАК для публикации результатов кандидатских и докторских диссертаций. Также имеется ряд других публикаций в материалах различных конференций. Результаты прошли широкую апробацию, в том числе, на нескольких авторитетных международных конференциях. Содержание диссертации полностью соответствует специальности 1.3.4. – Радиофизика.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа «Особенности синхронизации и подавления паразитных колебаний в гиротроне при воздействии внешнего гармонического сигнала» удовлетворяет всем требованиям пп. 9–11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Григорьева Наталия Вадимовна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика.

Официальный оппонент:

Заведующий отделом высокочастотной релятивистской электроники ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН), д.ф.-м.н. (по специальностям 01.04.04 «Физическая электроника» и 01.04.08 «Физика плазмы»), профессор, член-корреспондент РАН

Гинзбург Наум Самуилович

«_2_» декабря 2024 г.



603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.

email: ginzburg@ipfran.ru

Тел: +7 (831) 436-62-02

Подпись Н.С. Гинзбурга заверяю:

Ученый секретарь ИПФ РАН



к.ф.-м.н. И.В. Корюкин